



位相限定相関法に基づく生体画像処理とその応用に関する研究

著者	田島 裕一郎
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第15919号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58700

氏名（本籍地）	た じま ゆう いち ろう 田 島 裕 一 郎
学 位 の 種 類	博 士（情報科学）
学 位 記 番 号	情 博 第 号
学位授与年月日	平成26年 3月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科、専 攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）情報基礎科学専攻
学 位 論 文 題 目	位相限定相関法に基づく生体画像処理とその応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	（主査）東北大学教 授 青木 孝文 東北大学教 授 篠原 歩 東北大学教 授 川又 政征 （工学研究科） 東北大学准教授 本間 尚文

論 文 内 容 の 要 旨

第1章 緒言

生体画像は人体や生物を対象に撮影した画像であり、それらの画像から人間に有用な情報を抽出すること、ないしは人間が見やすい画像に変換することを生体画像処理と呼ぶ。これらの生体画像処理には様々な画像処理技術が必要とされるが、その中でも重要な技術の一つに、「画像マッチング」がある。画像マッチングには、二つの画像がどれだけ似ているか評価する「画像照合」と、二つの画像の間の変形を求める「画像レジストレーション（位置合わせ）」がある。生体画像は、一般の画像処理（工業向け画像処理など）に利用される画像と比べ、非線形な画像変形や撮影機器の違いなどによる画像変化が大きいため、高精度な画像マッチング技術が要求される。これまで多くの画像マッチング手法が提案されているが、本論文ではそれらの中でも、バイオメトリクスを始めとした各種の生体画像処理への有効性が実証されている位相限定相関法に着目する。

位相限定相関法は画像を離散フーリエ変換して得られる位相成分を利用した高精度画像マッチング手法であり、輝度変化など様々な外乱に対してロバストにマッチング可能である。本論文では、生体画像処理の中でも特にセキュリティ向け画像処理と医用画像処理に焦点を当て、位相限定相関法に基づく画像マッチング技術を通して各分野における問題を解決することを目指す。セキュリティ向け画像処理では、位相限定相関法に基づく画像照合技術を応用し、各種の環境変化にロバストな顔認証アルゴリズムを提案する。医用画像処理では、位相限定相関法に基づく画像レジストレーション技術を応用し、高精度かつ高速なボリュームレジストレーションを提案する。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全文6章よりなる。

第2章 生体画像処理に関する基礎的考察

本章では、本論文で扱う範囲において、生体画像処理に関して基礎的考察を行う。生体画像処理の主な領域として医用画像処理やセキュリティ向けの画像処理があるが、これらは大きく異なる技術的背景を持っている。このことを踏まえ、本論文ではそれぞれの分野に対して個別に基礎的考察を行う。

医用画像処理においてはボリュームレジストレーションに着目し、これに関する基礎的考察を行う。CT (Computed Tomography) や MRI (Magnetic Resonance Imaging) を代表とする医用画像は、体外から直接見ることでできない体内の構造や状態を可視化するための技術であり、医療現場において広く貢献してきた。近年では、単に2次元画像としての利用にとどまらず、複数の断面画像を積層してボリュームデータとして再構成することで、体内の立体的構造を直感的に把握することも可能となった。画像診断において、複数のボリュームデータの比較や合成などは画像診断において欠かせない処理であるが、一般に撮影タイミングの異なるボリュームデータ間には未知の位置ずれが存在するため、これらの処理には高精度なレジストレーション技術が不可欠である。これまで多くのボリュームレジストレーション手法が提案されているが、中でもボク

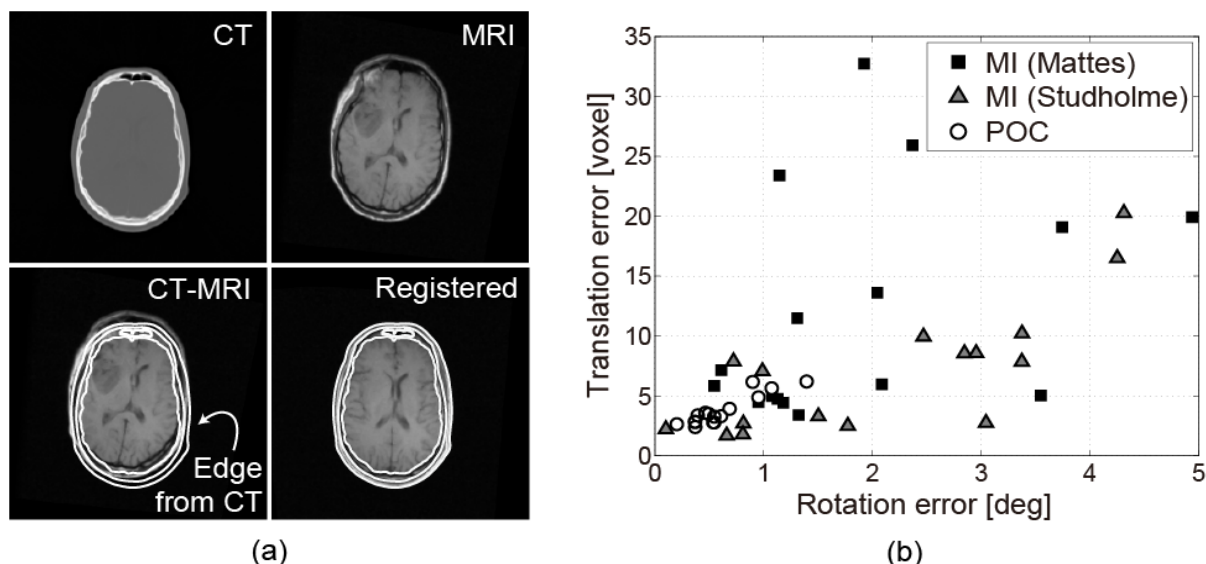


図1：レジストレーション精度の評価実験：(a) 実験に使用した CT, MRI データならびに提案手法によるレジストレーション結果, (b) 従来手法との精度比較

セル類似度最大化に基づく手法は、位置合わせ精度の高さから最も盛んに研究されている手法である。一方でこの手法は、非線形最適化のために高い計算コストを必要するという問題があり、精度と計算時間の両面で優れたレジストレーション手法が求められている。

セキュリティ向け画像処理においては、バイオメトリクス認証、中でも顔認証に着目する。バイオメトリクス認証は人間の身体的特徴を利用した個人認証技術であり、鍵やパスワードと異なり「失くす」、「忘れる」、「盗まれる」と言った危険性がない。身体的特徴としては指紋、顔、虹彩などが利用されているが、本論文では、利便性の高さから顔認証に着目する。顔認証は、利点として非接触・非拘束で認証可能な高い利便性が挙げられるが、一方で、各種の環境変化に伴う認証精度の低さが問題となっている。環境変化の要員としては照明変化、表情変化、姿勢変化、遮蔽領域などがあり、これらに対してロバストな顔認証手法が求められている。

第3章 位相限定相関法に基づく画像マッチング

本章では、本論文における重要な基盤技術である位相限定相関法について述べる。位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) は、画像の離散フーリエ変換から得られる位相成分だけを利用して、二つの画像から位相限定相関関数 (POC 関数) と呼ばれる相関関数を計算する。輝度変化に影響を受ける画像の振幅成分を取り除くことで、画像の明るさの変化など、様々な外乱に対してロバストなマッチングが可能となる。また、位相限定相関法は、複雑・ランダムなパターンを持つ画像に対して特に高いマッチング性能を示すため、その代表例である生体画像には特に有効であることが期待できる。

POC 関数は、デルタ関数に近い極めて鋭いピークを持ち、このピークの高さは二つの画像間の類似度に対応し、ピークの座標は画像間の相対的な位置ずれに対応する。このピーク形状は、理論的に導出することが可能であるため、この理論モデルを離散的な値として得られる POC 関数に対してフィッティングすることで、サブピクセル精度でピークの座標と高さを推定することができる。

実際に生体画像のマッチングを高精度に行うためには、通常の POC 関数をそのまま用いるのではなく、様々な高精度化手法を適用することが重要になる。例として、窓関数による画像端での不連続性の軽減、スペクトル重み付けによる低信頼な周波数成分の抑制などがあげられる。また、生体画像処理において必須となるボリュームデータのマッチングのため、従来の2次元の位相限定相関法を新たに拡張し、さらに3次元位相限定相関法に基づくボリューム対応付け手法を提案する。

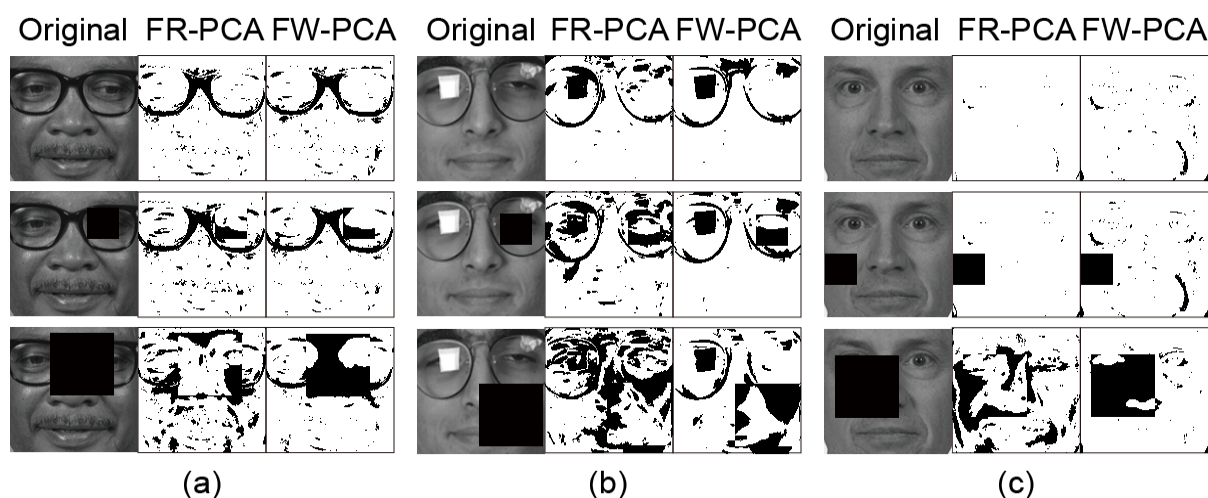


図 2：遮蔽検出の結果：(a) 被験者 A, (b) 被験者 B, (c) 被験者 C（上段：自然遮蔽のみ，中段：人工遮蔽（小）あり，下段：人工遮蔽（大）あり）

表 1：各手法の認証誤り率[%]

認証手法	修復手法	自然遮蔽	人工遮蔽（小）	人工遮蔽（大）
LBP	修復無し	21.89	34.96	45.15
	FR-PCA	20.67	26.33	43.96
	FW-PCA	20.67	24.85	40.23
POC	修復無し	4.22	14.72	35.76
	FR-PCA	4.10	11.26	28.69
	FW-PCA	4.00	11.20	23.08

第 4 章 位相限定相関法に基づく生体画像のレジストレーションー医用画像処理への応用

医用画像処理の中でも特にボリュームレジストレーションに着目し，位相限定相関法に基づく医用ボリュームデータのマッチング技術を開発した．ボリュームレジストレーションは医用画像処理における基本処理の一つであり，医用画像の比較読影や合成といった画像診断に欠かせない技術である．これまでに提案されているボリュームレジストレーション手法は，ボリュームデータ間の類似度最大化に基づく手法が一般的であるが，これらは，ボリュームデータのような巨大なデータに対して非線形最適化を適用する必要があるため，計算コストがきわめて高い．これらに対して，本章では，位相限定相関法に基づくボリューム間対応付けを利用したボリュームレジストレーション手法を提案する．提案手法では，サブボクセル対応付けによって高精度な位置合わせが可能だけでなく，従来のボリュームレジストレーション手法で一般的に用いられる複雑な最適化計算を必要としないため，位置合わせに要する計算時間を大幅に削減することができる．また，提案手法は，位相情報つまり画像の形状の情報を利用するため，位置合わせするデータが CT と MRI のような異モダリティの画像であっても，画像間で共通する形状を共有していればマッチングが可能である．さらに，非剛体変形への対応も容易であり，B スプラインを用いた非剛体レジストレーションへの拡張についても議論する．

実際に複数の患者から取得された CT や MRI のボリュームデータを用いた実験を通し，提案手法の有効性を確認する．実験データとして図 1 (a) の上段に示す頭部 CT, MRI データを各一個用意した．そして MRI データに数通りの変形を与え，各変形 MRI データと CT データの間で剛体位置合わせを行い，その誤差を測定した．図 1 (b) は従来手法 (Mattes らの手法および Studholme らの手法) と精度を比較した結果である．提案手法では，誤差が小さいことを示す原点付近に，プロットが最も集中していることを確認できる．図 1 (a) の下段は提案手法による位置合わせ結果であり，CT-MRI 間の変形が正しく補正されていることが分かる．平均計算時間は Mattes らの手法が 749 sec., Studholme らの手法が 2,382 sec., 提案手法が 67 sec.であり，精度と速度の

両面での性能向上を達成している。

第5章 位相限定相関法に基づく生体画像の照合一セキュリティ向け画像処理への応用

セキュリティ向け画像処理に対して位相限定相関法による生体画像の照合技術を応用し、バイオメトリクス認証、特に顔認証における有効性を示す。顔認証は非接触かつ非拘束で認証可能という利便性の高さが長所であるが、照明変化や表情変化、姿勢変化、遮蔽領域といった要因によって高い認証精度の達成が困難であることが問題となっている。この問題に対し様々な対策手法が提案されているが、中でも位相限定相関法による画像対応付けに基づく手法は、照明変化や表情変化、姿勢変化といった種々の精度低下要因にロバストである特徴を持つ。さらに、従来の主な顔認証手法に比べ、高性能な認証が可能であることが実験により確認されている。一方で、上記のアルゴリズムは顔画像上の遮蔽領域を考慮していないため、眼鏡や髭などによって顔が隠れてしまうと認証性能が低下してしまう問題がある。これに対し本論文では、位相限定相関法による顔認証手法と遮蔽修復手法を組み合わせた新たな顔認証手法を提案する。高速化かつ簡便な遮蔽修復手法として、FW-PCA (Fast-Weighted Principal Component Analysis) に基づく遮蔽修復手法を開発し、遮蔽領域を伴う顔画像に対しても、位相限定相関法による高精度な顔認証を実現できることを実証する。

図2は FW-PCA に基づく遮蔽修復結果である。従来の修復手法である FR-PCA (Fast-Robust PCA)では遮蔽領域の未検出が目立つ一方、FW-PCA では大部分が検出されていることを確認できる。表1は、一般に公開されている顔画像データベースを用いて認証率を評価した結果である。従来の顔認証手として LBP (Local Binary Patterns) に基づく手法を利用している。表1では、位相限定相関法と FW-PCA を組み合わせた提案手法が最も高い認証率を示しており、提案手法の有効性を確認できる。

第6章 結言

以上、本論文では、生体画像処理の中でも医用画像処理とセキュリティ向け画像処理に着目し、双方の分野に対して位相限定相関法に基づく体系的な技術開発を行った。医用画像処理においては、ボリュームレジストレーションに対して位相限定相関法を応用し、従来手法に比べて精度と計算時間の両面における性能向上を達成した。セキュリティ分野においては、顔認証に対して位相限定相関法を応用し、様々な環境変化にロバストかつ従来手法にくらべ高精度な顔認証アルゴリズムを提案した。今後、本論文における生体画像処理技術をさらに発展させるために取り組むべき課題として、より広範な医用画像や身体的特徴に対して位相限定相関法の有効性を検討していく必要がある。